

Научная статья

УДК 631.371

DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-95-102

Энергоэффективные электроприводы в агропромышленном комплексе: анализ, моделирование и оптимизация режимов работы

Аслан Анатольевич Кумахов^{✉1}, Залимхан Русланович Кудаев²,
Сайдмагомед Хасанович Кушаев³, Юрий Сафарбиевич Хапов⁴

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

^{✉1}kumahov071@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4760-3496>

²zalimhan007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7446-4583>

³kushaev1969@mail.ru

⁴YS-007@mail.ru

Аннотация. Энергетика агропромышленного комплекса (АПК) является одной из ключевых составляющих устойчивого развития сельского хозяйства. Современные сельскохозяйственные предприятия характеризуются высокой энергоёмкостью технологических процессов, что обусловлено применением широкого спектра электромеханического оборудования – от насосных и вентиляционных систем до транспортеров, мельниц, кормораздатчиков, доильных установок и систем климат-контроля. По данным Министерства сельского хозяйства РФ, на электроприводы различного назначения приходится от 60 до 75% общего энергопотребления в сельхозпроизводстве. В этих условиях повышение энергоэффективности электроприводов становится одной из приоритетных задач технической модернизации аграрного сектора. Проблема заключается в том, что большинство эксплуатируемых электродвигателей работают в режиме неполной загрузки, при низком коэффициенте мощности и отсутствии систем адаптивного управления. Это приводит к значительным потерям активной и реактивной энергии; ускоренному износу оборудования; повышенным эксплуатационным расходам; снижению общей энергоэффективности предприятий. Современные исследования показывают, что только за счёт внедрения частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) и оптимизации режимов работы асинхронных двигателей можно добиться снижения энергозатрат и потенциальной экономии электроэнергии, равной (0,1–0,25%) от текущего энергопотребления предприятия. Однако на практике внедрение таких решений затруднено рядом факторов: отсутствием комплексных моделей энергоэффективности электроприводов в условиях изменяющихся нагрузок; отсутствием систем интеллектуального мониторинга параметров работы; недостаточной интеграцией с цифровыми платформами управления производством (SCADA, IoT, MES).

Ключевые слова: энергетика, электроприводы, асинхронные двигатели, частотно-регулируемый привод, интеллектуальные системы, энергетический аудит

Для цитирования: Кумахов А. А., Кудаев З. Р., Кушаев С. Х., Хапов Ю. С. Энергоэффективные электроприводы в агропромышленном комплексе: анализ, моделирование и оптимизация режимов работы // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова 2025. № 4(50). С. 95–102. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-95-102

Original article

Energy-efficient electric drive in the agro-industrial complex: analysis, modelling and optimization of operation modes

Aslan A. Kumakhov^{✉1}, Zalimkhan R. Kudaev², Kushayev S. Khasanovich³,
Yuri S. Khapov⁴

Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue,
Nalchik, Russia, 360030

^{✉1}kymahov071@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4760-3496>

²zalimhan007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7446-4583>

³kushaev1969@mail.ru

⁴YS-007@mail.ru

Abstract. Energy in the agro-industrial complex (AIC) is a key component of sustainable agricultural development. Modern agricultural enterprises are characterized by high energy intensity in technological processes, which is due to the use of a wide range of electromechanical equipment – from pumping and ventilation systems to conveyors, mills, feed dispensers, milking machines, and climate control systems. According to the Russian Ministry of Agriculture, electric drives for various purposes account for 60 to 75% of total energy consumption in agricultural production. Under these conditions, improving the energy efficiency of electric drives is becoming a priority for the technical modernization of the agricultural sector. The problem is that most electric motors in operation operate at partial load, with a low power factor and a lack of adaptive control systems. This leads to: significant losses of active and reactive energy; accelerated equipment wear; increased operating costs; and a decrease in the overall energy efficiency of enterprises. Modern research shows that by implementing variable-frequency electric drives (VFDs) and optimizing the operating modes of asynchronous motors alone, it is possible to achieve potential energy savings equal to (0.1–0.25) of a company's current energy consumption. This approach is aimed at reducing energy costs. However, in practice, the implementation of such solutions is hampered by a number of factors: the lack of comprehensive models for the energy efficiency of electric drives under changing loads; the absence of intelligent monitoring systems for operating parameters; and insufficient integration with digital production management platforms (SCADA, IoT, MES).

Keywords: power engineering, electric drives, asynchronous motors, variable frequency drives, intelligent systems, and energy audit

For citation: Kumakhov A.A., Kudayev Z.R., Kushaev S.Kh., Khapov Yu.S. Energy-efficient electric drives in the agro-industrial complex: analysis, modeling and optimization of operating modes. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2025;4(50):95–102. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-95-102

Введение. Электроприводы составляют основу энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий. В последние годы внимание исследователей сосредоточено на повышении энергоэффективности асинхронных и синхронных двигателей, применяемых в насосных установках, вентиляционных системах, транспортерных линиях и других технологических процессах [1, 2].

Согласно данным Минсельхоза РФ (2023), энергопотребление на действующих фермах часто превышает нормативные показатели на

15–20%, что связано с эксплуатацией устаревшего оборудования и отсутствием систем управления нагрузкой [3, 4].

Научные исследования последних лет (Белов, 2022; Левченко, 2023; Писарев, 2021) подчеркивают, что основными направлениями повышения энергоэффективности являются:

– оптимизация режимов работы двигателей – подбор номинальных нагрузок, снижение холостого хода и минимизация пусковых токов [5];

– использование частотно-регулируемых приводов (ЧРП), позволяющих плавно изменять скорость вращения в зависимости от потребностей нагрузки [6];

– компенсация реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей для повышения коэффициента мощности ($\cos \varphi \backslash \cos \varphi_{\text{участка}}$) [7];

– применение интеллектуальных систем мониторинга и управления (SCADA, IoT), системы предиктивного обслуживания [8].

Цель исследования – разработка научно-обоснованных методов анализа и оптимизации режимов работы электроприводов сельскохозяйственного назначения на основе моделирования энергетических процессов и внедрения адаптивного управления.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

– проанализировать структуру и особенности электроприводных систем в сельском хозяйстве;

– исследовать закономерности изменения энергоэффективности асинхронных двигателей при различных режимах нагрузки;

– разработать математическую модель электропривода с учётом характеристик двигателя, привода и нагрузки;

– оценить энергетические потери и определить резервы энергосбережения;

– предложить алгоритмы адаптивного регулирования для оптимизации режимов работы электродвигателей.

Материалы и методы исследования.

Наиболее распространённые подходы к оптимизации электроприводов включают:

1) статистический анализ нагрузки и энергопотребления – позволяет выявить пики потребления и определить зоны неэффективной работы двигателя;

2) математическое моделирование электроприводов – используется классическая модель асинхронного двигателя с учётом механических и электрических потерь:

$$P_1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi; \quad (1)$$

$$P_2 = M \cdot \omega; \quad (2)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (3)$$

где

P_1 – потребляемая мощность;

P_2 – полезная механическая мощность;

ΔP – потери;

M – момент на валу;

ω – угловая скорость;

3) энергетический аудит и расчет КПД;

4) методы позволяют оценить текущие потери и определить потенциальный резерв энергосбережения.

Интеллектуальное управление с адаптивными алгоритмами. Системы продуктивного регулирования позволяют оптимизировать режимы работы электроприводов в реальном времени, учитывая текущие технологические требования и внешние условия¹.

Результаты и исследования. Несмотря на значительный прогресс в области энергоэффективных технологий, на практике внедрение оптимизированных режимов работы электроприводов в АПК затруднено:

1) отсутствием унифицированных моделей для различных типов нагрузок;

2) недостаточной интеграцией с существующими системами управления предприятия;

3) сложностью в подборе оптимальных алгоритмов адаптивного регулирования для нестабильной нагрузки;

4) ограниченной квалификацией персонала, ответственного за эксплуатацию современных ЧРП и интеллектуальных систем.

Эти проблемы подчеркивают необходимость разработки комплексного подхода, включающего моделирование, анализ и адаптивное управление электроприводами [9] (табл. 1).

Из таблицы видно, что комплексное применение методов (ЧРП + компенсация реактивной мощности + адаптивное управление) обеспечивает максимальный эффект.

Для анализа и оптимизации режимов работы электроприводов в АПК используется классическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Электрическая часть двигателя описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} us = Rs \cdot is + Ls \cdot \left(\frac{di \cdot s}{dt} \right) + es; \\ ur = Rr \cdot ir + Lr \cdot \left(\frac{di \cdot r}{dt} \right) + er, \end{cases} \quad (4)$$

¹ГОСТ Р 51522-2000. Электроприводы переменного тока. Общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2000.

Таблица 1. Эффективность методов оптимизации электроприводов
Table 1. Efficiency of electric drive optimization methods

Метод оптимизации	Снижение энергопотребления	Сложность внедрения	Применимость в АПК
ЧРП	15–25%	Средняя	Широкая
Компенсация реактивной мощности	5–10%	Низкая	Широкая
Интеллектуальные системы управления	10–20%	Высокая	Ограниченнная (требует цифровизации)
Статистический аудит	5–15%	Средняя	Широкая

где

us, ur – напряжение статора и ротора, В;
 is, ir – токи статора и ротора, А;
 Rs, Rr – сопротивления обмоток, Ом;
 Ls, Lr – индуктивности обмоток, Гн;
 es, er – электродвижущие силы.

Механическая часть модели описывается уравнением движения ротора:

$$J \cdot \frac{dt}{d\omega} = M_e - M_l - M_f, \quad (5)$$

где

J – момент инерции, кг·м²;
 ω – угловая скорость, рад/с;
 M_e – электромагнитный момент, Н·м;
 M_l – нагрузочный момент, Н·м;
 M_f – моменты трения и сопротивления, Н·м.

Полезная механическая мощность на валу определяется как:

$$P_2 = M_e \cdot \omega, \quad (6)$$

а КПД двигателя рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = M_e \cdot \frac{\omega}{U \cdot I \cdot \cos\varphi}. \quad (7)$$

Нагрузки в АПК отличаются большим разнообразием и динамичностью. Для упрощённого анализа используется модель изменяющейся нагрузки:

$$M_l(t) = M_{\text{ном}} \cdot \alpha(t), 0 \leq \alpha(t) \leq 1, \quad (8)$$

где

$M_{\text{ном}}$ – номинальный момент;
 $\alpha(t)$ – коэффициент загрузки, зависящий от технологического процесса.

Энергопотребление двигателя за период Т оценивается как:

$$E = \int_0^T U \cdot I(t) \cdot \cos\varphi(t) dt. \quad (9)$$

Это позволяет оценить динамические потери и определить оптимальные режимы работы.

Методы, используемые для повышения энергоэффективности

Частотно-регулируемые приводы (ЧРП). Плавное изменение скорости двигателя позволяет экономить электроэнергию при изменении нагрузки по закону куба:

$$P \propto n^3, \quad (10)$$

где

n – частота вращения ротора.

Компенсация реактивной мощности. Установка конденсаторных батарей повышает коэффициент мощности $\cos\varphi$ и снижает потери на линии передачи:

$$\Delta P = \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \cos\varphi. \quad (11)$$

Адаптивное управление нагрузкой. Интеллектуальные контроллеры регулируют скорость и момент вращения двигателя в зависимости от реальной нагрузки, что позволяет снизить простой и оптимизировать энергопотребление.

Рассмотрим в качестве примера насосную установку в животноводческом комплексе: мощность двигателя: $P_{\text{ном}}=7,5$ кВт; время работы: $t=3000$ ч/год; средняя нагрузка: 70%; коэффициент мощности: $\cos\varphi=0,78$; КПД двигателя: $\eta=0,88$.

Потребляемая энергия до оптимизации:

$$E_1 = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 0,7 \cdot 3000}{0,88} \approx 17,9 \text{ тыс. кВт.ч.} \quad (12)$$

После внедрения ЧРП и компенсации реактивной мощности (нагрузка 85%, $\cos\varphi=0,95$, $\eta=0,92$):

$$E_2 = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 0,85 \cdot 3000}{0,92} \approx 16,6 \text{ тыс. кВт.ч.} \quad (13)$$

Экономия энергии:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \approx 1,3 \text{ тыс. кВт} \cdot \frac{\text{ч}}{\text{год}}. \quad (14)$$

При тарифе 6 руб./кВт·ч экономия составляет 7800 руб./год на одном двигателе.

Применение комбинации математического моделирования, ЧРП и адаптивного управления позволяет оптимизировать режимы работы электроприводов; снизить энергопотребление на 7–25%; повысить коэффициент полезного действия оборудования; уменьшить износ и продлить срок службы двигателей; интегрировать управление с цифровыми платформами (SCADA, IoT).

Для оценки эффективности применения частотно-регулируемых приводов (ЧРП) и адаптивного управления проведён сравнительный расчёт потребляемой энергии для насосной установки в животноводческом комплексе [10] (табл. 2).

Таблица 2. Энергопотребление до и после оптимизации

Table 2. Energy consumption before and after optimization

Показатель	До оптимизации	После оптимизации
Мощность двигателя, кВт	7,5	7,5
Средняя нагрузка, %	70	85
Коэффициент мощности сопр	0,78	0,95
КПД, η	0,88	0,92
Энергопотребление, тыс. кВт·ч	17,9	16,6
Экономия, тыс. кВт·ч	–	1,3

Формулы расчёта энергии до оптимизации:

$$E_1 = \frac{(P_{\text{ном}} \cdot t)}{\eta}; \quad (15)$$

после оптимизации:

$$E_2 = \frac{(P_{\text{ном.о}} \cdot t)}{\eta}; \quad (16)$$

экономия:

$$\Delta E = E_1 - E_2; \quad (17)$$

Прогноз экономии при масштабировании.

Если на ферме используется 10 одинаковых насосных установок, экономия энергии составит:

$$\Delta E_{\text{общ}} = \Delta E \cdot 10 \approx 13 \text{ тыс. кВт} \cdot \frac{\text{ч}}{\text{год}}. \quad (18)$$

При тарифе 6 руб./кВт·ч – это 78000 руб./год экономии только на насосах.

Для других типов оборудования (кормораздатчики, вентиляция, сепараторы) аналогичные мероприятия позволяют снизить потребление энергии на 7–25%, что при масштабировании на весь АПК даёт значительную экономию.

В качестве выводов по экономии энергии можно предоставить следующие пункты:

- применение ЧРП и адаптивного управления показало реальное снижение энергопотребления;

- экономический эффект пропорционален количеству оборудования и времени работы;

- внедрение интеллектуального управления позволяет не только экономить электроэнергию, но и продлить срок службы оборудования.

Прогноз показывает, что для крупных комплексов экономия может достигать сотен тысяч рублей в год, что делает мероприятия высокоэффективными и рентабельными.

Для повышения энергоэффективности в агропромышленном комплексе рекомендуется:

- использовать частотно-регулируемые приводы (ЧРП) на насосах, вентиляторах, кормораздатчиках;

- выбирать электродвигатели с повышенным КПД (IE3 и выше);

- применять адаптивные системы управления, учитывающие динамику нагрузки и технологические процессы;

- внедрять систему мониторинга и учёта энергопотребления, интегрированную с SCADA или IoT-платформой.

Расчёт экономической эффективности. Пусть на предприятии установлено N электродвигателей с номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$ каждый, работающих t часов в год.

Энергопотребление до оптимизации:

$$E_1 = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{ном}} \cdot i \cdot \alpha i \cdot t}{\eta i}, \quad (19)$$

где

αi – средняя нагрузка;

ηi – КПД двигателя.

Энергопотребление после внедрения ЧРП и адаптивного управления:

$$E_2 = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{ном}} \cdot i \cdot \alpha i' \cdot t}{\eta' i}. \quad (20)$$

Экономия энергии:

$$\Delta E = E_1 - E_2. \quad (21)$$

Экономический эффект: экономия, руб.= ΔE тариф электроэнергии.

Если мы рассчитаем прогнозный эффект и сроки окупаемости на примере фермы с 10 насосами по 7,5 кВт каждый, то получим следующие цифры: энергопотребление до оптимизации: 17,9 тыс. кВт·ч/год на один насос; после оптимизации: 16,6 тыс. кВт·ч/год; экономия на 10 насосах: 13 тыс. кВт·ч/год; тариф электроэнергии: 6 руб./кВт·ч; экономия в денежном выражении: 78 000 руб./год; стоимость внедрения ЧРП и адаптивного управления на 10 насосов: ~150 000 руб.; срок окупаемости: ~2 года;

Выводы. Энергоэффективные электроприводы являются ключевым инструментом снижения затрат и повышения надёжности оборудования в агропромышленном комплексе.

Совокупное применение ЧРП, адаптивного управления и цифровых систем мониторинга позволяет достичь значительных экономических и экологических эффектов.

Дальнейшее развитие технологий и интеграция с цифровыми платформами создаёт основу для «умного» АПК с минимальным энергопотреблением и высокой производительностью.

Проведено математическое моделирование асинхронных электроприводов с учётом изменяющейся нагрузки и потерь энергии.

Разработаны методы оптимизации работы электродвигателей в АПК с использованием частотно-регулируемых приводов (ЧРП) и адаптивного управления.

Выполнен инженерный расчёт и показана реальная экономия энергии: до 7–25% на отдельных агрегатах.

Прогноз масштабируемой экономии для фермы с 10 насосами составил около 13 тыс. кВт·ч/год, что эквивалентно экономии 78000 руб./год.

Определены сроки окупаемости внедрения энергоэффективных электроприводов – от 1 до 3 лет в зависимости от масштаба и количества оборудования.

Список литературы

1. Афанасьев В. Н. Электроприводы и их применение в сельском хозяйстве. Москва: Колос, 2018. 256 с.
2. Богатырев Н. И., Кумейко А. А., Харченко С. Н. Автоматизированный электропривод сельскохозяйственных установок: учебное пособие. Краснодар, 2024. 106 с. ISBN: 978-5-907906-96-9. EDN: LJPPJВ
3. Кудаев З. Р., Кумахов А. А. К вопросу энерго- и ресурсосбережения извещения // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2021. № 4(34). С. 45–52. EDN: ZVCAPQ
4. Барагунов А. Б. Частные составляющие технологии и оборудования молочного животноводства в горных условиях // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2024. № 1(43). С. 99–107. DOI: 10.55196/2411-3492-2024-1-43-99-107. EDN: CRCKXR
5. Литвинов Д. В. Автоматизация технологических процессов в АПК. Казань: Казанский университет, 2017. 198 с.
6. Гусев Ю. М., Иванова Е. П. Частотно-регулируемые приводы в промышленности и сельском хозяйстве. Москва: Машиностроение, 2019. 224 с.
7. IEEE 112-2017. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors [Электронный ресурс]. IEEE, 2017. URL: https://standards.sae/IEEE_112-2017 (дата обращения 18.03.2025)
8. Оськин С. В. Автоматизированный электропривод: учебное пособие. Краснодар: Изд-во КРОН, 2014. 510 с. ISBN: 978-5-94672-600-9. EDN: TNPBSD

9. «Пассивный дом» как технология энергосберегающего строительства / З. Р. Кудаев, А. А. Кумахов, А. Г. Фиапшев [др.] // International agricultural journal. 2021. Т. 64. № 5. 26. DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10379. EDN: TVLMQI

10. Аккиев Р. Я., Забаков Э. М., Барагунов А. Б. Энергосберегающий аспект в аграрном направлении // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции. Нальчик, 2023. С. 7–10. EDN: UQYTLS

References

1. Afanasyev V.N. *Elektroprivody i ikh primenie v sel'skom hozaystve* [Electric drives and their application in agriculture]. Moscow: Kolos, 2018. 256 p. (In Russ.)
2. Bogatyrev N.I., Kumeiko A.A., Kharchenko S.N. *Avtomatizirovannyj elektroprivod sel'skohozyajstvennyh ustanovok: uchebnoe posobie* [Automated electric drive of agricultural installations: a tutorial]. Krasnodar, 2024. 106 p. ISBN: 978-5-907906-96-9. (In Russ.). EDN: LJPPJB
3. Kudaev Z.R., Kumakhov A.A. On the issue of energy and resource conservation. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2021;4(34):45–52. (In Russ.). EDN: ZVCAPQ
4. Baragunov A.B. Partial components of dairy animal technology and equipment in the mountain conditions. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2024;1(43):99–107. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2024-1-43-99-107. EDN: CRCKXR
5. Litvinov D.V. *Avtomatizaciya tekhnologicheskikh processov v APK* [Automation of technological processes in the agro-industrial complex]. Kazan: Kazanskij universitet, 2017. 198 p. (In Russ.)
6. Gusev Yu.M., Ivanova E.P. *Chastotno-reguliruemye privody v promyshlennosti i sel'skom hozaystve* [Variable-frequency drives in industry and agriculture]. Moscow: Mashinostroenie, 2019. 224 p. (In Russ.)
7. IEEE 112-2017. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors [Electronic resource]. IEEE, 2017. URL: https://standards.sae/IEEE_112-2017 (date of access: 18.03.2025)
8. Osokin S.V. *Avtomatizirovannyj elektroprivod: uchebnoe posobie*. [Automated Electric Drive: A Tutorial]. Krasnodar: Izd-vo KRON, 2014. 510 p. ISBN: 978-5-94672-600-9. (In Russ.). EDN: TNPBSD
9. Kudaev Z.R., Kumakhov A.A., Fiapshev A.G. [et al.] "Passive House" as an energy-saving construction technology. *International agricultural journal*. 2021;64(5):26. (In Russ.). DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10379. EDN: TVLMQI
10. Akkiyev R.Ya., Zabakov E.M., Baragunov A.B. Energy saving aspect in agriculture. *Energoressursosberezenie i energoeffektivnost': aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sb. nauch. tr. II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Energy resource conservation and energy efficiency: current issues, achievements and innovations: collection of scientific papers from the II International Scientific and Practical Conference]. Nalchik, 2023. Pp. 7–10. (In Russ.). EDN: UQYTLS

Сведения об авторах

Кумахов Аслан Анатольевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 8661-7780

Кудаев Залимхан Русланович – старший преподаватель кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 5253-0367

Кушаев Саид Хасанович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4154-6929

Хапов Юрий Сафарбиевич – учебный мастер кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 3246-9050

Information about the authors

Aslan A. Kumakhov – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Energy Supply to Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 8661-7780

Zalimkhan R. Kudayev – Senior Lecturer, Department of Energy Supply to Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 5253-0367

Said K. Kushaev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Energy Supply to Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4154-6929

Yuriy S. Khapov – Teaching Assistant, Department of Energy Supply to Enterprises, Federal State Budgetary, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 3246-9050

Авторский вклад. Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант статьи.

Author's contribution. All authors have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. All authors have read and approved the final version of this article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 31.10.2025;
одобрена после рецензирования 27.11.2025;
принята к публикации 05.12.2025.*

*The article was submitted 31.10.2025;
approved after reviewing 27.11.2025;
accepted for publication 05.12.2025.*